

Estática y geometría: el proyecto de puentes de fábrica en los siglos XV al XVII

Santiago Huerta Fernández

La estructura de un puente de fábrica consta de cimentación, pilas, bóvedas y cepas o estribos (en los extremos del puente). Hay otros elementos secundarios: los tímpanos, el relleno y la calzada. El puente debe disponer, además, de pretils y sistemas de desagüe. Finalmente, puede ir adornado con distintos motivos compositivos (impostas, columnas,...) o escultóricos. En este artículo nos ocuparemos del proyecto de la estructura de los puentes de fábrica en el período que va desde 1400 a 1700 en base a los documentos originales que han llegado hasta nosotros: libros de fábrica y tratados de arquitectura e ingeniería. La primera fecha corresponde al manuscrito más antiguo que se conoce en el que se describe la construcción de un puente: el que se conserva en el Archivo Municipal de Zaragoza. La última marca una frontera menos clara, la que separa los métodos tradicionales de proyecto de lo que podríamos denominar el cálculo o proyecto científico de puentes.

La construcción de un puente es una tarea de especialistas: requiere un conjunto de conocimientos que podríamos denominar «teoría» y, además, el constructor debe haber adquirido experiencia «práctica» asistiendo a la construcción de varios puentes, bajo la dirección de un maestro. «La práctica no es nada sin la teoría» (como dijo Mignot en el Congreso de expertos de la catedral de Milán), pero la teoría sin la práctica es un mero azar. El constructor al trazar el puente debe tener la seguridad de que al descimbrar las bóvedas éstas no se hundirán. El ingeniero moderno realiza, para verificar la seguridad de un cierto

proyecto un análisis de la estructura; este análisis se basa en la aplicación de las leyes de la estática y de la resistencia de materiales.¹ Se trata de una verificación «científica». ¿De qué naturaleza era la teoría empleada por los arquitectos e ingenieros de la Edad Media, el Renacimiento o el Barroco?

La fuente de información más fiable son los escritos originales; qué decían los propios constructores sobre la traza de puentes. El examen de los documentos revela que los antiguos maestros constructores empleaban ciertas reglas aritméticas o geométricas para dimensionar las pilas, estribos y bóvedas de sus puentes. También llevaban un registro de las dimensiones de puentes existentes y, en base a ello, elaboraban tablas que relacionaban los parámetros más relevantes. Realizaremos a continuación un breve inventario de estas reglas en el período citado, siguiendo un orden cronológico.²

EL PUENTE DE PIEDRAS DE ZARAGOZA

La única fuente medieval escrita que conozco en la que se trata explícitamente la traza de un puente de piedras es el manuscrito que se conserva en el Archivo Municipal de Zaragoza sobre la construcción del llamado Puente de Piedras. El manuscrito recoge documentos y actas sobre la traza y obra del citado puente, que comienzan a partir de 1401. El códice, en folio, sin ilustraciones ni dibujos, con cubiertas de pergamino resulta bastante difícil de leer. Afortuna-

damente Herranz publicó a finales del siglo pasado una transcripción parcial. Recientemente el CEHO-PU ha realizado una transcripción completa del manuscrito.³

El manuscrito es una mina de información sobre los procedimientos constructivos, materiales, maquinaria etc., empleados en la construcción del puente. Nos interesa la parte en la que se describe la formación de las pilas, pues, las dimensiones que aparecen sugieren el empleo de una regla aritmética sencilla en su dimensionamiento: asignar a cada pila el tercio del vano correspondiente. Los párrafos resultan un poco confusos. Al parecer, dice Herranz, existía un antiguo puente del siglo XIII que se derrumbó quedando solamente una arcada. Según el manuscrito este arco era de 99 palmos y su pila de 34 palmos ($1/3$ de la luz), y parece deducirse, que en el extremo contrario quedaba otra pila de 20 palmos. Restaban por cubrir 456 palmos de río. En el informe se barajan dos propuestas. La primera es de tres tramos con su pila correspondiente de 133 palmos (se supone la misma proporción que antes, arco 99 pila 34), quedando un vano de 60 palmos (lo que guardaría también la misma relación, $1/3$, con la pila existente de 20). La segunda contempla tres pilas de 30 palmos, dos vanos de 90 palmos, dos vanos de 80 palmos y una pila de 20. La pila de 20 resultaría insuficiente según la susodicha regla. No sabemos si debido a ello, los maestros recomiendan construir en ella dos torres defensivas. A continuación el texto del manuscrito según la transcripción de Herranz⁴:

...Et apres los dos maestros [Maestre Johan de Frenoya y Maestre Colrat] visto almallo el dito puent consellaron sobre la forma como quell se podia comenzar y acabar sus la forma siguient.

Primerament trobaron que la ultima arquada feyta del puent de piedra en tal Rio Ebro que ha de tono novante i nueu palmos de canya... Continuando que medida la ampleza del pilar de la dita ultima archada i que trobade Trenta y Quatro palmos de canya ...

...que trobado que del piet zagüero de la buelta zagüera de piedra entró a la puerta del puent ha Quatrocientos cinquante y seys palmos. los quales compartidos en tres arcadas y tres pïedes a raxon de cient trenta i tres palmos entre archada y piet vista de tono para la quarta archada del puent sixante palmos.

Maestre Johan de Frenoya y Maestre Colrat conselleron y ordenaron que en la obra del puent de piedra avia necesarias quatro archadas y tres pïedes y otro piet a la puerta de vint palmos. Et que los ditos tres

pïeds havian pro de cada trenta palmos de amplo. Et las primeras dos arcadas consegutivas al puent de piedra cada novante palmos de tono. Et las otras dos cada huytante palmos de tono i que les parecia que en el piet de la puerta de vint palmos que por bel parecer de la hobra se devïesse prender en tal manera que hi pudiesen seyer feytas Dos torretas una de cada part que serian delant la puerta del dito puent.

Resulta evidente que los constructores estaban manejando como regla de proyecto para las pilas que éstas debían tener un tercio de la luz.

ALBERTI

El tratado de arquitectura de Alberti fue iniciado probablemente hacia 1435-1440 y fue presentado formalmente al Papa Nicolás V en 1452. La edición príncipe, en latín, se publicó en 1485 y es, por tanto, anterior a la primera edición de Vitruvio.⁵ En España, la primera traducción se publica en 1582 (basada en la traducción italiana de Bartoli de 1565).⁶ Esta última es la que hemos utilizado.

Desde el punto de vista de la historia de las técnicas constructivas este tratado no ha recibido la atención que merece. Aunque Alberti leyó diligentemente a los antiguos, Vitruvio, Plinio, Frontino..., en modo alguno su obra es una mera recopilación de opiniones diversas, sino, más bien, el fruto de sus investigaciones no sólo de las fuentes escritas sino de los monumentos existentes, así como de su propia experiencia profesional. El resultado es un compendio de todo el saber constructivo de su época. Los métodos constructivos no varían de forma brusca y, en efecto, la construcción en Alberti es la construcción tardomedieval. La influencia del tratado en los siglos posteriores fue enorme: sus recomendaciones y reglas aparecen citadas una y otra vez hasta bien entrado el siglo XVIII.

El tratado de Alberti contiene algunas reglas estructurales y observaciones constructivas muy interesantes. Las hemos agrupado por temas.

Proyecto de arcos en general

Alberti distingue tres tipos básicos de arcos: de medio punto, rebajado y apuntado. Recomendaba que los arcos se hagan de dovelas de gran tamaño y que éstas

sean iguales entre sí, «los cuños de que se haze el arco querria que fuesen todos de piedra ancha, y quanto pueda ser grande» y que las juntas entre dovelas se dirijan a los centros de curvatura de su línea de intradós. Finalmente, advierte de que la clave ha de ser más grande que el resto de las dovelas: «el cuño del espinazo sienpre, los exercitados, le pusieron de una piedra entera y muy grande...».⁷

En cuanto a la forma del arco, Alberti consideraba el arco más estable y resistente el de medio punto (y así fue considerado, en general, hasta el siglo XVIII). Trata de demostrarlo por «razon y argumento» y sus observaciones son interesantes por dos motivos:

- 1) porque constituyen el primer intento de explicación del funcionamiento estructural de un arco, e influyeron muy posiblemente en los comentarios de de Baldi⁸ sobre los arcos, posteriormente recogidos en forma de teoremas por Wotton.⁹
- 2) porque ponen de relieve la importancia de la distribución de las masas en la estabilidad de un arco, hecho éste clave en el diseño estructural de las estructuras de fábrica.

En el segundo aspecto los comentarios de Alberti no dejan lugar a dudas sobre la importancia de una adecuada proporción de las masas para conseguir el equilibrio de un arco:

El arco recto ser el mas firme de todos se ve por ello mismo, y demuestrase por razon y argumento. Y no veo en que manera se pueda deshazer de suyo, sino es que de los cuños el uno empuje al otro echandole fuera, de la qual injuria estan tan apartados que aun el uno se confirma con la ayuda del otro, y si por ventura acometiessen hazer esto son prohibidos por la natura de los pesos debajo de que estan, o con que los mismos cuños estan embutidos... Y esto se puede ver porque el cuño mas alto que es uno solo en el espinazo de en medio, como puede echar fuera los cuños de los lados o apremiandolos ellos mismos quando podra el ser echado fuera del asiento y ocupado: pero los cuños que succeden cercanos por los costados facilmente son retenidos en sus officios con la igualdad de los pesos. Finalmente los cuños que estan asentados en las dos cabeças, porque han de ser movidos estando los de arriba en sus officios?¹⁰

Son interesantes también las observaciones sobre los otros dos tipos de arcos. De los arcos rebajados resalta el poderoso empuje que producen y propone

para eliminarlo la colocación de tirantes de hierro, o para reducirlo la disposición de arcos superiores de descarga de medio punto. En cuanto a los arcos apuntados observa que pueden resistir grandes cargas verticales, en particular si éstas se disponen en la clave. Por todo ello los considera los más adecuados para las puertas en la base de las torres: «Los arcos conpuestos no se ven acerca de los antiguos [...] ay algunos que piensan que se han de poner en las aberturas de las torres, para que hienan los pesos puestos encima como con proa contrapuesta, porque los arcos conpuestos se confirman con los pesos puestos encima, mas que no son opprimidos.»¹¹

Puentes

Alberti se ocupa del proyecto de puentes en dos lugares distintos de su tratado: en el Libro IV, cap. 6, «De los puentes de madera y de piedra, y de sus pilares, bovedas, arcos...», y en el libro VIII, cap. VI, «De las calles más principales de las ciudades, y como se adornan, las puertas, puertos, puentes...». Las reglas de Alberti constituyeron, con pequeñas alteraciones, la 'doctrina oficial' sobre los puentes hasta mediados del siglo XVIII.¹² Aunque, como es natural, se construyeron puentes que se apartaban de lo estipulado por Alberti, en particular en lo que se refiere al empleo de arcos rebajados, la regla para el dimensionado de las pilas fue cuestionada por escrito por primera vez por Perronet.¹³

En primer lugar se decide el grosor de los pilares, que debe ser la cuarta parte de la altura, «la grosseza de los pilares sera con la altura de la puente en proporcion subquadrupla». A continuación indica que los arcos deberán ser, en general, de medio punto y su luz no deberá ser mayor que seis ni menor que cuatro veces el grosor del pilar. La rosca del puente será más gruesa en su frente (los arístorces o arcos de boquilla): «cualquier arco que estuviere en la frente de esta boveda se hara de piedra muy dura y grande,... y no avra en el arco piedras mas delgadas, que a lo menos no respondan con su grosseza en la decima parte de su cuerda, y la cuerda no sera mas larga que seys vezes la grosseza del pilar, y no mas corta que quatro.»¹⁴

Las instrucciones son tan precisas que permiten dibujar al traza de un puente «ideal»; así lo hizo Straub¹⁵, y su restitución aparece en la Figura 1. De hecho cualquier traza o dibujo implica una serie de

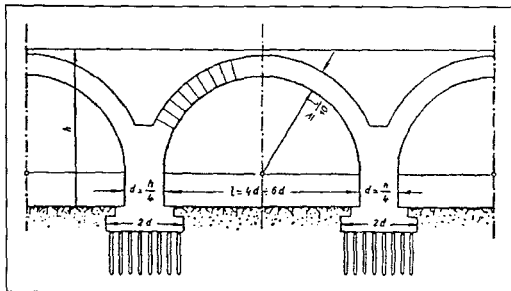


Figura 1.

Trazo de un puente según las reglas de Alberti (Straub, 1992)

relaciones proporcionales. La diferencia estriba en que en el dibujo están «ocultas» y, además, todas las posibles relaciones tienen la misma importancia: las reglas resaltan las relaciones fundamentales (en el caso de un puente, luz/grosor de la pila, luz/rosca de la bóveda).

No obstante, hay que señalar que el espesor de los aristones no tiene necesariamente que representar el espesor de la bóveda y, de hecho, Alberti se refiere explícitamente al «arco que estuviere en el frente de esta bóveda». Curiosamente el espesor de la bóveda lo da en otro libro; el espesor de la bóveda en los puentes grandes no será menor de 1/15 de la luz: «[los arcos] hazerse han gruesos en las grandes puentes no menos que por la decimaquinta parte de toda la abertura.»¹⁶ Esto es, en los puentes grandes la bóveda será más delgada que el arístón (esto se observa en casi todos los puentes de piedra).

Alberti recomienda el empleo de arcos de medio punto pero también admite la posibilidad de utilizar el arco rebajado cuando la situación lo exija, si bien advierte de que en este caso es preciso reforzar los estribos: «... y si por la disposición de los pilares de tal manera corresponde el recto que seas offendido con su demasiado relieve de medio círculo, usaremos del disminuido confirmados muy mucho los lados de la ribera con mayor grosseza». Además, insiste en la necesidad de macizar cuidadosamente los riñones de las bóvedas de los puentes.¹⁷

Finalmente, resalta la importancia de ejecutar los puentes con gran cuidado y empleando piedras de gran tamaño, en razón a los grandes pesos que ocasionalmente cruzarán por encima de ellos:

... las bóvedas y arcos, assi por las demas cosas, como por los fuertes y continuos temblores de los carros, conviene que sean muy señaladamente fuertes y maravillosamente affirmados. Y añade que algunas veces se han de traer por la puente, acaso, grandissimos pesos de colossos ... Y la razón persuade, que a las puentes se les deven muy grandes piedras enteras con el exemplo del yunque, porque si ella fuera grande y muy pesada facilmente sostiene los golpes de los martillos, pero si es mas liviana resiste a los golpes y se conmueve.¹⁸

PALLADIO

El tratado de arquitectura de Palladio,¹⁹ *Los cuatro libros de arquitectura*, publicado en Venecia en 1570, es quizá uno de los más influyentes de la historia de la arquitectura. En relación con las reglas de proyecto estructural de estructuras de fábrica en el libro sólo aparecen: 1) una regla para dimensionar los estribos para arcos y bóvedas; 2) modelos de puentes con sus proporciones geométricas fundamentales. La regla de los estribos aparece citada de nuevo en un informe sobre la loggia de Brescia.

Estribos en general

Palladio cita una regla aritmética para dimensionar los estribos de arcos y bóvedas. Curiosamente la regla es la misma que aparece implícita en el proyecto de las pilas del puente de Zaragoza (170 años anterior) y que hemos comentado más arriba: el estribo tendrá de grosor un tercio de la luz del arco o bóveda. Tiene sentido esta coincidencia pues las bóvedas de los puentes son de cañón y también lo son las bóvedas renacentistas.

Debería tratarse de una regla de uso común, pues Palladio la cita, como de pasada, dándola por sabida, al ocuparse del diseño de las arcadas.²⁰ Además, Palladio la vuelve a citar al escribir un informe pericial sobre la estabilidad de la loggia del Palacio de Brescia. Al tratar de los machones de la arcada inferior (que eran el objeto del informe) dice:

«En relación con los estribos resulta evidente para cualquier arquitecto experimentado que una construcción cualquiera sobre machones que tengan de grosor el tercio del vano de los arcos que los separan tendrá toda la solidez conveniente para durar durante largo tiempo...»²¹

Puentes

Palladio da varios modelos de puentes, estableciendo sus relaciones geométricas fundamentales: las dimensiones de la clave y de las pilas en relación con el vano. Cada uno de estos tipos dibujados puede considerarse como una 'regla de proyecto', análoga a la deducida por Straub a partir de las reglas de Alberti. El arquitecto o ingeniero podía luego aceptar o modificar esas proporciones en función de las condiciones particulares del proyecto.

En la Figura 2 se recogen los puentes de fábrica descritos en el tratado de Palladio. Los parámetros fundamentales de proyecto, siguiendo a Alberti, son: el espesor de la clave del arístón y el grosor de las pilas. Hemos hallado estas relaciones en base a las medidas del texto o, simplemente, midiendo sobre el dibujo, Tabla 1.

Puente	e/L	p/L
(a) Puente romano de Rimini	1/10	1/2
(b) Puente medieval sobre el Rerone	1/12	1/6
(c) Puente de Vicenza de Palladio	1/12	1/6
(d) Proyecto de Puente de Palladio	1/17	1/5.

(L = vano mayor; e = espesor en la clave; p = ancho de las pilas)

Tabla 1.

Relaciones proporcionales en los puentes recogidos por Palladio.

Como puede verse las proporciones no son muy distintas de las recomendadas por Alberti, con la única excepción de las pilas demasiado gruesas del puente romano de Rimini.

De hecho, la práctica de diseñar a partir de ejemplos construidos fue habitual y en los tratados de

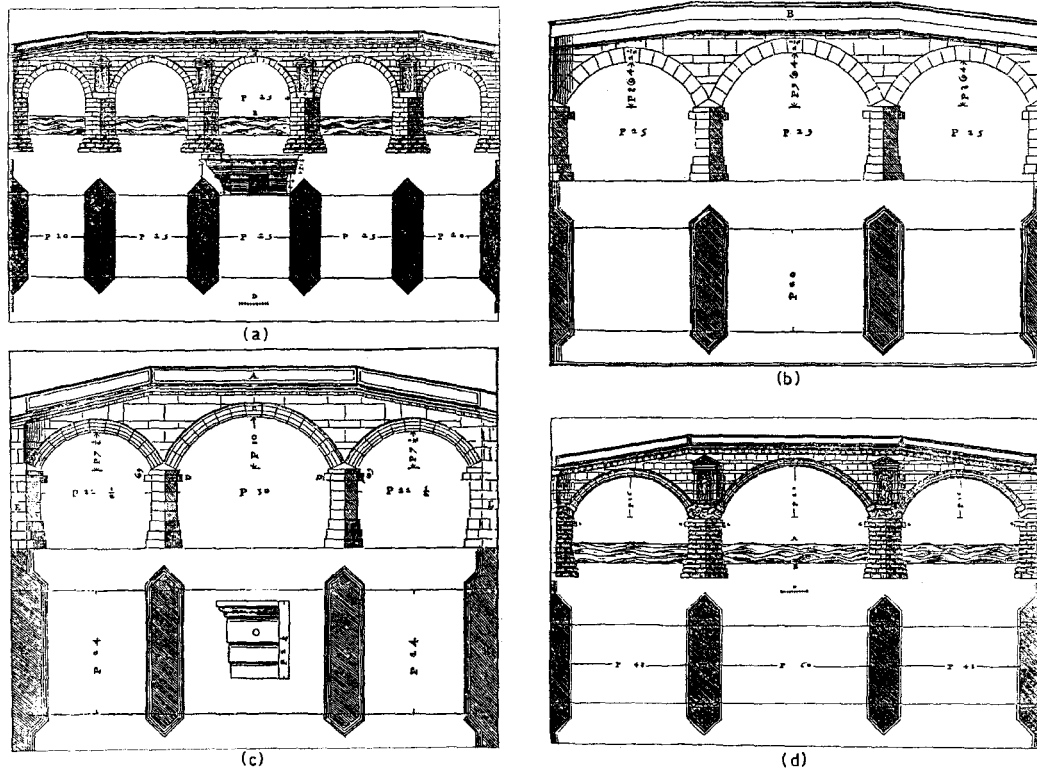


Figura 2.
Puentes de fábrica en el tratado de Palladio

puentes de los siglos XVIII y XIX, se dedicaba un parte considerable a realizar un catálogo de todos los puentes conocidos de los que se daban, además de datos históricos, sus dimensiones fundamentales: luz del vano o vanos, espesor en la clave y arranques, espesor y altura de las pilas.²²

LOS VEINTE Y UN LIBROS DE LOS INGENIOS, Y MAQUINAS DE JUANELO

Los veinte y un Libros de los Ingenios, y Maquinas de Juanelo, los quales le Mando escribir y Demonstrar el Chatolico Rei D. Felipe Segundo Rey de las Hespañas y nuebo Mundo... es el título del primero de cinco volúmenes manuscritos que se conservan en la Biblioteca Nacional de Madrid.²³ Es un documento de extraordinaria importancia dentro de la Historia de la Construcción pues se trata del primer tratado de lo que, hasta el siglo XIX, se conoció como *Arquitectura Hidráulica*.

Debido a la inclusión en el título del nombre Juanelo el manuscrito se ha atribuido tradicionalmente a Juanelo Turriano, el ingeniero y relojero italiano de Felipe II. García Diego el autor de la primera edición del manuscrito²⁴ pone en duda la autoría de Juanelo y fecha el manuscrito entre 1564 y 1595. Más tarde García Tapia ha defendido con pasión la atribución al ingeniero español Pedro Juan de Lastanosa.²⁵ El tema no parece cerrado todavía; en lo que sigue aludiremos al autor del manuscrito como Juanelo.

Las únicas reglas estructurales del tratado se refieren a los puentes y están contenidas en el Libro 18 «De como se an de hazer las pilas de las puentes de piedra en diversas maneras.» La influencia de Alberti en el tratado de Juanelo es evidente; sólo en aspectos constructivos aparecen innovaciones en el manuscrito, con una minuciosa descripción del proceso de ejecución de las pilas de los puentes.

Proyecto de arcos

Juanelo suscribe la doctrina de Alberti sobre el 'arco ideal': «El que es mas fuerte de todos los arcos es el de medio redondo; porque ninguna de las otras maneras es tan fuerte ni paresce tambien, ni tiene tanta gracia como el q' es hecho de medio redondo justamente.»²⁶

Insiste, como Alberti, en la necesidad de rellenar los riñones de las bóvedas con buena sillería, para mejorar la estabilidad: «... assi mesmo digo, que los arcos se deven hazer, con sus senos, o, costados que sean henchidos y firmes»;²⁷ y a continuación: «... lo que hay entre un arco y el otro se deve ir hinchendo de piedra de tal modo, que todo sea muy firme, ni se halle en toda la obra cosa mas firme».²⁸

En cuanto al canto de los arcos no da regla, pero sí aconseja, de nuevo siguiendo a Alberti, que las dovelas de los arcos de boquilla «... conviene hazerlas muy rezias, por causa del grande atronamiento de los carros,... y otros pesos que ordinariamente se ofresçen passar por la puente, como son artillerias, collossos, bobeliscos...»²⁹

Las claves de los arcos, recomienda que sean más grandes que el resto de las dovelas, y que se introduzcan, al final, a golpes con un martillo de madera para que hagan presión contra las otras dovelas antes del descimbramiento. De esta manera se pueden reducir los descensos de la clave en el momento del descimbramiento, y la línea de empujes se acomoda mejor dentro del arco:³⁰

... deve se labrar la clave del arco algo mas ancha en la parte de arriba, que ninguna de las otras piedras, la qual çierra el arco... y aun es necessario hazerla entrar a fuerça con calarla con algunos golpes para que entre con un maço de madera para que no se rompa la piedra y hincandose con fuerça haze que se aprieten todas las demas del arco y siendo muy bien apretadas estan muy mas firmes en su lugar y hazen todas muy bien su offiçio...³¹

Pilas y estribos de los puentes

Juanelo considera el dimensionado de las pilas como fundamental dentro de la construcción de puentes. Lo trata, pues, con detalle dando ejemplos numéricos y diagramas: «No se haga pues mas ancha la cuerda del arco de la puente que quanto es seis vezes gruesa su pila, y esto todo quanto se les puede quitar á las pilas, ni en alguna manera se çufre hazer las pilas mas delgadas de una sesena parte de la cuerda del arco, ni tampoco mas gruesas de la quarta parte de lo largo de la cuerda del arco, que ha de cargar ençima della.»³²

Para que no quede duda repite de nuevo un ejemplo y, lo que es más interesante, realiza un dibujo a

escala de un arco y el intervalo de variación posible de las pilas, sin duda para acostumbrar el 'ojo' del lector a las proporciones adecuadas (Figura 3):

Digamos agora que el arco tiene de cuerda, de modo que la sesena parte de sesenta es diez que seria lo ancho de la pila, y esto es hazerla tan estrecha, como se pueda hazer, y si tomassemos los mismos sesenta y hiziessemos dellos quatro partes, que es la mayor anchura que se pueda dar a una pila, q' vendria a ser quinze; de suerte que en estos dos extremos se pueden tomar todos aquellos medios, que hay de diez a quinze, iran repartiendo como mejor les pareciera, aunque la mejor proporción es de treze á doze y doze y medio y sale siempre más verdadera; de suerte que se puede quitar de quinze y añadir á diez, hase esto de hazer con buen juicio y discrecion y si la pila es quinze, no puede ser el arco menos de sesenta...³³

FRAY LORENZO DE SAN NICOLÁS

El tratado de arquitectura de Fray Lorenzo de San Nicolás consta de dos partes publicadas respectivamente los años 1639³⁴ y 1664³⁵. El tratado propiamente dicho lo forma la primera parte. La segunda parte se entiende como un complemento a la primera. Se trata, sin duda, del tratado de arquitectura más importante del siglo XVII en España. Según Kubler: «*El Arte y Uso de Arquitectura* es, desde muchos puntos de vista, el mejor libro sobre instrucción Arquitectónica escrito jamás...».³⁶

Desde el punto de vista de la historia de la construcción es un texto fundamental, que describe con claridad y detalle todos los procesos constructivos. Aunque Fray Lorenzo era un hombre de vasta erudición y conoce, y cita, los más importantes tratados de

arquitectura de su época, su obra no es en modo alguno un *collage* de opiniones de distintos autores, cosa harto frecuente en aquella época. Era un hombre estudioso pero crítico, y siempre expone su opinión con independencia y buen criterio.

El tratado de Fray Lorenzo contiene diversas reglas y observaciones sobre el diseño y construcción de arcos, bóvedas y cúpulas. Las comentaremos siguiendo el orden de aparición en el tratado.

Estribos de edificios

Las primeras reglas se refieren a los estribos de los templos. Aparecen formando un capítulo aparte³⁷ y constituyen el conjunto más completo de reglas para el dimensionado del contrarresto de las iglesias. Fueron citadas una y otra vez en todos los tratados posteriores hasta el siglo XIX. Para el presente artículo nos interesan únicamente los sabrosos comentarios que realiza sobre el proyecto de estribos, por la luz que pueden arrojar sobre su idea del proyecto de estructuras en general. En primer lugar Fray Lorenzo señala la importancia de la materia de que se trata: «Qué grueso ayan de tener [los estribos de un templo] para sustentarle, assi el de su mismo pesso, como el del empujo de las bovedas, importa mucho el acierto.»

A continuación cita el caso de San Pedro de Roma, donde los contrafuertes tienen un canto de la mitad del vano lo cual le parece excesivo: «Hemos ido adelgazando los ingenios, y a este passo los edificios, y en el tiempo presente se conoce la mucha grosseza de los edificios antiguos, y la sutileza de los presentes.»

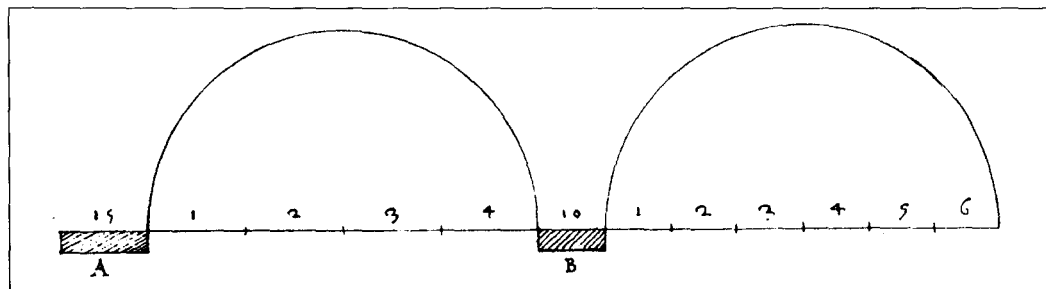


Figura 3

Intervalo de variación posible de las pilas de los puentes, según Juanelo

Discute la creencia general de que los daños se deben precisamente a las proporciones más esbeltas y señala que comunmente se deben a fallos en las cimentaciones o al paso del tiempo:

Podràn decirme, que por tanto adelgazar ha auido ruinas en ellos. A esto respondo dos razones, y es, que el daño ha nacido de estar mal plantados, mas que de su delgadez. Y lo otro, que ni los edificios plantados muy gruesos en sus paredes, han dexado de tener muy grandes ruinas, como las historias diçen, causadas del tiempo, de que adelante trataremos.

Finalmente afirma que un exceso en el dimensionado puede ser tan perjudicial como quedarse corto, refiriéndose, en forma implícita, a la necesidad de buscar un equilibrio entre las distintas partes: «Conserve a un cuerpo, segun sienten los Phisicos, una mediana en el sustento; porque la abundancia la acaba, y la falta le destruye; así siento que passa en los edificios, que mucho peso, o grueso les hace abrir quiebras, y falta de grueso les hace perecer: así, que conviene que guarde una mediana para conservarle.»³⁸ En definitiva, Fray Lorenzo defiende un proyecto correcto donde la cantidad de fábrica se ajusta a lo estrictamente necesario.

Proyecto de arcos

Fray Lorenzo dedica un capítulo completo al tema de los arcos, sus tipos y estereotomía.³⁹ Como Alberti, procede de manera sistemática: primero define los distintos tipos de arcos: «Muchos son los generos de los arcos que la industria ha inventado: mas aunque muchos, reducirlos hemos à cinco... Los nombres a los que los reduzco son: el primero, es escarzano, el segundo carpanel o apaynelado, el tercero buelta de cordel, ò punto hurtado, el quarto medio punto, el quinto todo punto.»

Sobre cuál de ellos es el mejor, desde un punto de vista estructural, suscribe la doctrina de Alberti: «Entre todos es el mas fuerte el de medio punto, y el mas agradable a la vista, y al fin en todo el mas perfecto.»

Menciona el problema clave del diseño de arcos: determinar su canto en función de la luz, sin embargo no da ninguna regla (en efecto, como hemos visto el espesor depende de la configuración de cargas que soporta el arco): «Del grueso de los arcos no se puede dar regla asentada y cierta aunque algunos la dan:

mas en esto el Maestro le aya prudente, y conforme à lo que ha de sustentar el grueso.»

Más adelante se reafirma en su opinión:

...del grueso que han de tener los arcos, de que no podemos dar regla, como diximos en el cap.42. y es la razon, que si a un grueso de veinte y cinco pies diessemos dos de rosca, a uno de cinquenta aviamos de dar quatro, y esto podria convenir en puentes, de que adelante trataremos, mas no conviene en Templos; y assi el grueso quede arbitrariamente a juicio del Maestro.⁴⁰

Los comentarios sobre las propiedades y ventajas estructurales de cada tipo de arco coinciden con las expresadas con Alberti. Así, sobre el arco de medio punto dice: «Este es un arco muy perfecto, como en su lugar diximos, y muy seguro, con tal que los empujos esten acompañados con suficientes estrivos, de que en su lugar diremos, assi deste, como de los demás».

Es muy interesante la alusión a una regla para conocer el estribo correspondiente a cada arco. Sin embargo, en este caso Fray Lorenzo parece haberse olvidado de su promesa y ni en la primera ni en la segunda parte de su tratado aparece ninguna mención (o al menos no la hemos encontrado) sobre este particular.

Sobre el arco apuntado, menciona su empleo en los arbotantes y su propiedad de no sólo resistir empujes horizontales sino también verticales: «Este arco puede sufrir muchissimo peso, y comunmente se echa el medio para recibir algun empujo de Iglesia, salvando alguna calle; y estando assi le llamamos botarete».⁴¹

Pilas y arcos de puentes

Fray Lorenzo dedica un capítulo completo al tema de los puentes⁴². Su doctrina está claramente inspirada en la de Alberti, aunque como es habitual en él expresa sus propias opiniones y existen algunas desviaciones.

Como todo buen constructor de fábricas sabe que el comportamiento estructural es el mismo para estructuras de ladrillo o piedra, «... siendo las puentes de ladrillo, y piedra, lo que se dixere de la una, se ha de entender de la otra por ser en todo muy semejantes».

Sigue una descripción muy detallada de la construcción de las pilas de los puentes que, dice, han de tener de espesor la mitad de la luz: «El grueso de las cepas ha de ser por la mitad del hueco del arco.» Esta proporción es muy conservadora e indica que Fray Lorenzo era más un arquitecto de edificios, en el sentido actual de la palabra, que de puentes.

Como Alberti recomienda macizar y levantar las pilas hasta los dos tercios de los arcos: «Los estrivos levantarán hasta los dos tercios de los arcos, y hasta el ultimo se irán rematando con la misma nariz del tajamar, ò angulo, que llevará bien soldado, para que assi tambien sea defendido el estribo de las inclemencias del tiempo.» También aconseja para hacer el puente más seguro levantar « algunas Torres, fundadas sobre sus cepas; porque el peso en las avenidas, resiste el impetu de las aguas; y assi las vemos en las puentes del Arzobispo, y Alcantara, y en otras partes».

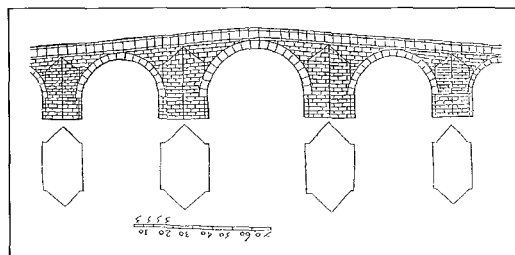


Figura 4
Diseño de puente según Fray Lorenzo

En el caso de los arcos de los puentes favorece el empleo del arco de medio punto que, como hemos visto, considera el mejor estructuralmente: «La buelta que el arco ha de tener será bien sea de medio punto, por ser mas fuerte.»

Sobre el canto de los arcos de la bóveda distingue como Alberti entre los aristones, las piedras del borde, y las del interior de la bóveda. Para las primeras de una proporción de 1/12 de la luz (Alberti propone 1/10, Palladio 1/12), para las segundas no da regla, si bien advierte que deben ser considerablemente más gruesas que en el caso de las bóvedas de los edificios:

El grueso de las dobelas será de alto en las bobedas segun al Artifice pareciese: mas los aristones, que son las

dobelas exteriores, que reciben los golpes, serán por la dozaba parte de su ancho, aunque en el capitulo quarenta y uno diximos, que no se podia dar regla cierta para los gruesos de los arcos. Mas en este caso corre muy diferente regla; porque se ha de considerar, que por una puente pasan muchos, y diversos pesos de piedras, golpes de carros, y otras cosas y por esta razon conviene, que sean tan gruesas las bobedas, ò arcos de los puentes: y si el grueso que pide fuese tal, que comodamente no se puedan subir, ni assentar sus dobelas, en tal caso lo repartirán en dos bobedas, o arcos, y servirá de cimbra la primera à la segunda, y assi quedará la puente segura.

SIMÓN GARCÍA

El Tratado de Simón García, nunca llegó a publicarse, y se conserva en forma manuscrita en la Biblioteca Nacional de Madrid.⁴³ Parece ser la obra de un erudito que ha consultado muchas fuentes. Los primeros siete capítulos son copia de un tratado perdido de Rodrigo Gil de Hontañón, como el propio Simón García indica. Una buena parte del resto del manuscrito está inspirada, muchas veces copiada literalmente, del tratado de Fray Lorenzo. En efecto, Simón García copia profusamente de Fray Lorenzo pero tiene un índice distinto. Resulta, por tanto, laborioso comparar ambos tratados y, quizá por esta razón, la influencia de Fray Lorenzo en Simón García ha pasado hasta el momento desapercibida.⁴⁴

Proyecto de puentes: reglas para las pilas

En el tratado hay un capítulo con el título «de puentes Regla General»,⁴⁵ que, contiene una regla excepcionalmente interesante para el dimensionamiento de las pilas de los puentes: en vez de basarse en proporciones lineales (sea geométrica o aritméticamente) como ha sido el caso hasta ahora, utiliza proporciones de áreas.⁴⁶ Así, la pila ha de tener de superficie la mitad de la superficie que cubre la bóveda del puente; es decir, el producto de su luz por el ancho de la calzada. Las proporciones de la pila, sin embargo, no aparecen claramente establecidas y dice vagamente que se den tres partes al tajamar situado en la dirección de la corriente y dos al de la parte de abajo:

La orden que se a de tener para sacar la traça de un puente, y darle el area que requiere el pilar segun el an-

cho del puente, y el largo de uno de los arcos sera esta ... Teniendo cuenta de dar a los pilares el area que requieren que será de esta manera de exemplo. En esta planta que queda señalada con A, que tiene el arco de longitud 40 pies. Y de ancho 16 pues multiplica 40 por 16 y baldran 640. La mitad de estos 640 que son 320 será el area que tendra este pilar, y el tajamar que está aca la parte de arriba que corta el agua tendra tres partes y el de abajo dos; tambien se a de mirar que si este edificio se a de haçer a donde el rio ba angosto y recio, en tal caso el puente sea mas ancho, que quando el rio ba tendido y manso porque desta suerte no halle la furia tanto en que haçer presa como si fuese el pilar ancho...



Figura 5
Dibujo original del manuscrito de Simón García

Una interpretación podría ser, basándose en la figura y manteniendo la forma del tajamar de arriba (arco apuntado aproximadamente equilátero) y abajo (rectangular), que la relación entre las longitudes transversales de ambos esté en la relación de 3 a 2. Como, a su vez, los dos serían función del ancho de la pila, en este caso todas las dimensiones quedarían prefijadas al determinar la luz (L) y ancho (A) del tramo, produciéndose las relaciones geométricas que aparecen en la Figura 6. De esta forma podemos establecer relaciones entre la luz del tramo (L) y el espesor de la pila (e), L/e , para cada proporción del tramo L/A (véase Figura 7).⁴⁷

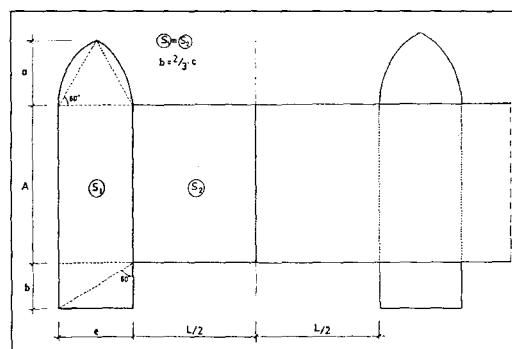


Figura 6
Restitución hipotética de la geometría

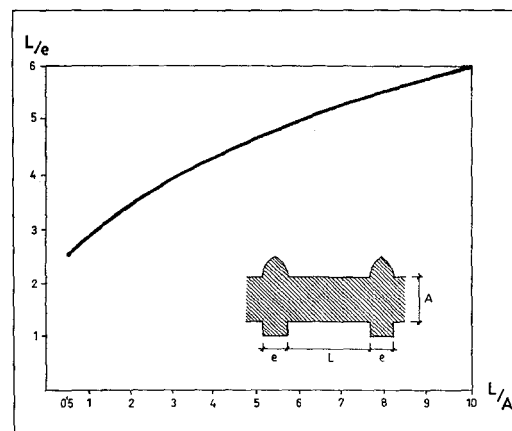


Figura 7
Relación entre luz y espesor de la pila en la hipótesis anterior

Como puede observarse los valores del espesor de la pila están comprendidos entre $1/3$ y $1/6$ de la luz. A medida que la calzada se hace más estrecha influye más el papel estabilizante de los tajamares y la pila disminuye de espesor. Esta manera tan sofisticada de relacionar varias variables parece corresponder más a la tradición de Rodrigo Gil que a la de Alberti/Palladio. La forma de presentar la regla también coincide y, en nuestra opinión, es probable que esta regla perteneciera al antiguo manuscrito de Rodrigo Gil.

Más adelante, siguiendo su afán erudito, Simón García menciona las reglas de Alberti; cita primero a Cataneo⁴⁸ pero su libro es muy posterior y las reglas citadas por Simón García que corresponden al tratado de Alberti: «... Segun Cataneo, no seran las pilas-tras mas subtiles que la sexta parte del hueco del arco y conuerda con Leon Baptista Alberto que en el libro 4º Cap. 6, dice que sean los pilares de grueso la terçia parte de la mitad del arco que viene a ser la sexta del arco entero.»

En cuanto al espesor de la bóveda del puente repite de nuevo la regla de Alberti: «Las dobelas de los arcos serán tan altas como la 10ª parte del ojo maior y ya que no puedan ser tan grandes todas las dobelas por lo menos los aristones.»

Conclusión

El rastreo reflejado en las páginas anteriores pone de manifiesto que para los constructores de puentes, arquitectos o ingenieros, la traza era un problema de geometría: consistía en dar a los elementos principales de la estructura, las pilas y cepas y las bóvedas, las dimensiones relativas correctas. Esto conducía a reglas de proporción, independientes del tamaño. La unanimidad de todas las fuentes consultadas no deja lugar a dudas en cuanto a la confianza de los antiguos constructores en este «cálculo geométrico» de las estructuras.

Las reglas fueron empleadas, con éxito, durante siglos. No obstante, la naturaleza del cálculo es tan distinta del actual, que han surgido frecuentemente dudas sobre su validez.⁴⁹ No obstante, las reglas son del tipo correcto para las estructuras de fábrica. Como ha demostrado el profesor Heyman, la aplicación de la moderna teoría del análisis límite conduce precisamente a las mismas afirmaciones de tipo geo-

métrico.⁵⁰ Se trata de conseguir un estado de equilibrio con esfuerzos de compresión (los únicos que puede resistir la fábrica) y esto, para peso propio, conduce a determinadas proporciones. Es un problema de equilibrio entre empujes y contrarrestos, de la adecuada colocación de los pesos, de la sabia transmisión de los empujes a través de las piedras: «Ut pondera libra, sic aedificia architectura», del mismo modo que se pesa en la balanza, así, se construye la arquitectura.⁵¹

NOTAS

1. Para un resumen del desarrollo de la teoría científica de arcos y bóvedas de fábrica, véase: J. Heyman. *The masonry arch*. West Sussex, Ellis Horwood, 1982; S. Huerta «La teoría del arco de fábrica: desarrollo histórico» *Obra Pública*, Nº 38, 1996. pp. 18-29; K. E. Kurrer. «Zur Entwicklungsgeschichte der Gewölbetheorien von Leonardo da Vinci bis ins 20. Jahrhundert» *Architectura*, Vol. 27, 1997. pp. 87-114; para el desarrollo en el siglo XIX: E. Benvenuto, M. Corradi y F. Foce. «Sintesi storica sulla statica di archi, volte e cupole nel XIX secolo.» *Palladio*, Vol. 1, Nº2, 1988. pp. 51-68.
2. Para un estudio más amplio del proyecto de estructuras de fábrica, incluyendo edificios y torres además de puentes, así como un inventario de las correspondientes reglas de proyecto, véase: Santiago Huerta Fernández. *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca. 1500- ca. 1800*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, 1990.
3. «Manuscrito del Puente de Piedras de Zaragoza.» Ms. 47, Archivo Municipal de Zaragoza. Su foliación denota que por lo menos tuvo 104 hojas, reducidas hoy a 99. En la primera página aparece el texto: «Libro comenzado de la manera como el puent de piedra de la Ciutat de Zaragoza se deve comenzar i acabar i de las piedras quantas son necesarias i qual piedra es millor para qualcuna i de qual arena era millor para fazer largamasa i de qual pedrera se tallaria la piedra para comenzar i acabar el dito puent.» La referencia de este documento la encontré en: P. Alzola y Minondo, *Las Obras Públicas en España. Estudio Histórico*. Bilbao: 1899, págs. 80-83. Hay una transcripción parcial en: C. Herranz y Lafínz, *Fábrica del Puente de Piedras de Zaragoza*. Zaragoza: 1887. La transcripción completa, realizada por D. Alberto Tamayo, puede consultarse en la Biblioteca del CEHOPU, en Madrid; existe el proyecto de publicarla en un futuro próximo.
4. Herranz, op. cit. págs. 16-17.

5. Dora Wiebenson (ed.) *Architectural Theory and Practice from Alberti to Ledoux*. Charlottesville, Va.: Architectural Publications Inc., 1982. s/pS
6. León Baptista Alberti *Los Diez Libros de Arquitectura de León Baptista Alberto. Traduzidos de Latín en Romance. [por Francisco Lozano]* Madrid: Casa de Alonso Gómez, 1582.
7. Alberti, Lib. III, cap. 13, pág. 86.
8. Bernardino Baldi *In mechanica Aristotelis problemata exercitationes...* Moguntiae: Viduae Joannis Albin, 1621. Citado por H. I. Dorn *The Art of Building and the Science of Mechanics. A Study of the Union of Theory and Practice in the Early History of Structural Analysis in England*. Ph.D.: Princeton University, 1970. pp. 52-53.
9. H. Wotton *The Elements of Architecture*. London: 1624. Citado por Dorn, op. cit. pp. 53-59. Existe una traducción al español del siglo XVII que comentamos en el correspondiente apartado.
10. Alberti, Lib. III, cap. 13, pág. 85.
11. *Ibidem*.
12. Alberti todavía aparece citado como una de las autoridades más importantes en el primer tratado específicamente de puentes el de H. Gautier *Traité des Ponts*. Paris: 1716. Más tarde escribe una memoria *Dissertation sur l'épaisseur des culées des Ponts, sur la Largeur des piles, sur la Portée des voussoirs, sur l'Erfort & la Pesanteur des Arches à differens surbaissemens...*, Paris: 1717, que se incorpora en las ediciones posteriores. He manejado la de 1728. El tratado de Alberti, aparece citado también como fuente fundamental en la enciclopedia de J. H. Zedler *Grosses vollständiges Universal-Lexikon Aller Wissenschaften und Künste...* Halle und Leipzig: Im Verlag Johann Heinrich Zedlers, 1735, Vol. 4, *Brücke*, pp. 1542.
13. J. R. Perronet «Mémoire sur la réduction de l'épaisseur des piles et sur la courbure qu'il convient de donner aux voûtes, le tout pour que l'eau puisse passer plus librement sous les ponts.» *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* 1777. pp. 853-64.
14. L. B. Alberti, Lib. IV, cap. 6, pág. 114.
15. H. Straub. *Die Geschichte der Bauingenieurkunst*. 4a. ed. Basel : Birkhäuser Verlag, 1992. pág. 129. Straub, dimensiona la cimentación en base a una regla para cimentar muros sobre terrenos anegados citada por Alberti en el Libro III, Cap. III, pág. 67.
16. Alberti, Lib. VIII, cap. 6, pág. 248.
17. L. B. Alberti, Lib. III, cap. 6, 115.
18. *Ibidem*.
19. A. Palladio *I quattro libri dell'architettura*. Venecia: Doiminico Franceschi, 1750. Edición facsímil, Milán: Hoepli, 1976. Esta es la edición que hemos manejado.
20. «Ma si faranno le Loggie co i pilastri, così si doveranno disporre, che i pilastri non siano manco grossi del terzo del vano, che farà tra pilastro, e pilastro: e quelli, che saranno ne i cantoni; andaranno grossi per la metà del vano, come sono quelli del Theatro di Vicenza, e dell'Anfiteatro di Capua, ovvero per li due terzi, come quelli del Theatro di Marcello in Roma; e del Theatro di Ogubio... ..Gli fecero gli Antichi alcuna volta ancho tanto grossi, quanto era tutto il vano comme nel Theatro di Verona in quella parte, che non è sopra il Monte. Ma nelle fabriche private non si faranno nè meno grossi del terzo del vano, nè piu de i due terzi, e doverebonno esser quadri.» Palladio, *I quattro libri...*, op. cit. pág. 16.
21. Véase B. Zamboni *Memorie intorno alle pubbliche fabbriche piu insigne della cita di Brescia*. Brescia: 1778. Citado por J. Rondelet *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris: 1834-48, Vol. 4, pp. 389-391. lám. 195, figs. 45-47. Es el texto que hemos usado. Para una transcripción ver también: Puppi, Lionello, *Andrea Palladio: Scritti sull'architettura (1554-1579)*. Vicenza : Neri Pozza Editore, 1988.
22. Véase por ejemplo: H. Gautier *Traité des Ponts...* Paris: 1714, el primer tratado dedicado específicamente a puentes; J. Leupold *Theatrum Pontificiale oder Schau-Platz der Brücken und Brücken-Baues*. Leipzig: Joh. Gledischens seel. Sohn, 1726, precursor de los grandes tratados alemanes; E. M. Gauthey *Traité de la construction des ponts*. Paris: 1809-1813, quizá el tratado de mayor difusión en el siglo XIX; etc... al final de esta tradición encontramos la obra de P. Sejourné *Grandes Voûtes*. Bourges: Imprimerie Vve Tardy-Pigelet et Fils, 1913-1916. Esta obra monumental cataloga todos los puentes en arco de fábrica u hormigón armado con luces por encima de los 40 metros.
23. Biblioteca Nacional de España, Madrid, Mss. 3372 a 3376 (5 vols.). Hay una reciente edición facsímil en 5 vols.: Madrid: Fundación Juanelo Turriano, 1996. Véase: L. Reti, «The Codex of Juanelo Turriano (1500-1585) in the Biblioteca Nacional de Madrid (MS 3372/3376) and Its Importance for the History of Technology.» *Actes du XIIe Congrès International d'Histoire des Sciences*, 1965, Vol. 6, 1968. pp. 79-83.
24. Juan Antonio García Diego titula expresivamente la edición: *Pseudo-Juanelo Turriano. Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas*. Madrid: Turner / Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, 1983. 2 vols. En sus «Reflesiones sobre los Veintiún Libros de Ingenios y Máquinas», en el Vol. 1 de la edición de 1996, abunda en sus argumentos en contra de la autoría de Juanelo Turriano. Del mismo autor: *Juanelo Turriano, Charles V's Clockmaker: The Man and His Legend*. Nantucket, Mass: Science History Publications, 1986.
25. Véase: N. García-Tapia «Los 21 libros de los ingenios y de las máquinas: su atribución.» *Boletín del Seminario de Estudios sobre Arte y Arqueología*, Vol. 50, 1984. pp. 434-439. Del mismo autor: *Ingeniería y arquitectu-*

- ra en el Renacimiento español Valladolid : Secretariado de Publicaciones, Universidad, 1990; Pedro Juan de Lastanosa. *El autor aragonés de «Los veintitún libros de los ingenios»*. Huesca : Instituto de Estudios Altoaragoneses, 1990.
26. Juanelo op. cit. fol. 374v.
 27. *Ibidem*.
 28. Juanelo, op. cit. fol. 376r.
 29. *Ibidem*, fol. 372r.
 30. Este procedimiento aparece citado como el tradicional por Perronet: 'Pour diminuer le tassement des voûtes et faciliter le décentrement des ponts, l'usage ordinaire a été, jusqu'au présent, de poser à sec un certain nombre des dernier cours de voussoirs; de les serrer fortement avec des coins de bois chassés à coups de maillet entre des lattes savonnées, et de les couler et ficher ensuite avec mortier de chaux et ciment'. Véase su «Memoire sur le cintrement et le décentrement des ponts, et sur les differens mouvements que prennent les voûtes pendant leur construction.» *Memoires de l'Academie Royale des Sciences*, 1773, pp. 33 y ss. Freyssinet, el último gran constructor de puentes de fábrica (y también fundador de una nueva forma de construir los puentes, con hormigón armado), ideó un procedimiento análogo al propuesto por Turriano para centrar la línea de empujes. Consistía en colocar unos grandes gatos hidráulicos y precomprimir la clave antes de introducir las últimas dovelas. El método está descrito en: E. Freyssinet «Perfectionnements dans la construction des grandes voûtes.» *Le Génie Civil*. Vol. 58, 1921, pp. 97-102, 124-128, 146-150.
 31. Juanelo op. cit. fols. 375v-376r.
 32. *Ibidem*.
 33. *Ibidem*.
 34. Fray Lorenzo de San Nicolás *Arte y Uso de Arquitectura. Primera parte*. Madrid: s.i., s.a. 1639. Suele decirse que la primera edición apareció en 1633, sin embargo tanto A. Bonet Correa como J. J. Martín González consideran más probable la de 1639, año en que se firmó la fe de erratas del libro. Véase: A. Bonet Correa *Bibliografía de Arquitectura. Ingeniería y Urbanismo en España (1498-1880)*. Madrid: 1980, vol. 1, pág. 88; y J. J. Martín González «Noticia del Arte y Uso de Arquitectura», prólogo de la edición facsímil, Madrid: Albatros, 1989, pág. 21.
 35. Fray Lorenzo de San Nicolás *Segunda Parte del Arte y Uso de Arquitectura... Con el Quinto y Séptimo Libros de Euclides traducidos del latín en Romance y las medidas difíciles de Bóvedas y de las superficies y pies cúbicos de Pechinas...* Madrid: s.i., 1665.
 36. Véase G. Kubler *Arquitectura de los Siglos XVII y XVIII. (Ars Hispaniae. Historia Universal del Arte Hispánico, vol.14)*. Madrid: 1957, pp. 79-82, donde Kubler hace un excelente comentario sobre el tratado de Fray Lorenzo.
 37. Fray Lorenzo, op. cit., primera parte, Cap. XXVIII, 'Trata de la fortificacion de un Templo'; Fray Lorenzo, op. cit., fols. 30v-31v.
 38. Op. cit., fol. 31r.
 39. Cap. XLII 'Trata de los generos delos Arcos, y de la forma que se ha de tener en labrarlos.', op. cit., fols. 64-74.
 40. Op. cit., fol. 75r.
 41. Op. cit. fol. 69r.
 42. Cap. LXV *Trata del sitio conveniente para las puentes, y de su fabrica.*, Op. cit. fols. 121v-125r.
 43. *Compendio de arquitectura y simetría de los templos conforme a la medida del cuerpo humano, por Simón García, architecto natural de Salamanca. Año 1681*. Ms. 8884, Biblioteca Nacional de Madrid. La primera edición facsímil completa del manuscrito fue realizada por Carlos Chanfón Olmos, Churubusco, México: 1979, con estudios introductorios de Antonio Bonet Correa «Simón García Tratadista de Arquitectura.», pp. vii-xiii, y del propio Carlos Chanfón «Simón García y la Antropometría.», pp. 7-37, y «Simón García y la Proporción Geométrica.», pp. 38-59. Otra edición más reciente, que parece inspirada en la anterior: Valladolid: Colegio Oficial de Arquitectos, 1991. 2vols.
 44. Este es el caso, por ejemplo, de los capítulos 48 al 52 que tratan de la medida de las bóvedas que están literalmente transcritos del capítulo 80 de Fray Lorenzo. También lo están los capítulos 69 y 70. En muchos otros capítulos hemos visto transcripciones literales, sin embargo, el orden del tratado de Simón García es distinto del de Fray Lorenzo y esto hace que las comparaciones sean realizadas un examen superficial que hace suponer que de una comparación detallada resultarían muchas más concordancias.
 45. Simón García, *Compendio de arquitectura*, op. cit., fol. 40v-41v.
 46. Este tipo de reglas «superficiales» no son frecuentes. En el libro de Carlo Fontana *Il Tempio Vaticano e sua origine*. Roma : Nella Stamparia di Gio: Francesco Buagni, 1694, se recoge una regla de este tipo para dimensionar los soportes de las cúpulas. Al parecer estas reglas se remontan hasta la época bizantina: A. Petronotis. «Der Architekt in Byzanz». *Bauplanung und Bauplanung der Antike. (Diskussionen zur Archäologischen Bauforschung 4.)*, Berlin: Wasmuth, 1983, pp. 329-343. Para un examen detallado véase: S. Huerta. «Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas», op. cit., págs. 210-211.
 47. Realizando un desarrollo algebraico sencillo se llega a que la regla establece la siguiente relación entre los dos parámetros adimensionales mencionados anteriormente, $L/A = \phi$ y $L/e = \delta$: $\delta^2 - 2\phi - 2k\phi = 0$ donde k es una constante de valor $k = \pi/3 + \sqrt{3}/12$.
 48. Pietro Cataneo *L'Architettura di Pietro Cataneo Siene-*

- se. Venecia; 1567. Citado por D. Wiebenson *Architectural Theory and Practice from Alberti to Ledoux*. Charlottesville: 1983, I-22.
49. Para una discusión en detalle sobre la validez de las reglas véase: S. Huerta, «Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas», op. cit, págs. 285-353.
50. El análisis límite de estructuras de fábrica ha sido desarrollado principalmente por el profesor Jacques Heyman de la Universidad de Cambridge. El profesor Heyman ha resaltado siempre el carácter fundamentalmente geométrico del proyecto de estructuras de fábrica. Véanse por ejemplo: J. Heyman. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos*. ed. por S. Huerta Madrid : Instituto Juan de Herrera, 1995, y J. Heyman *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid : Instituto Juan de Herrera / CEHOPU, 1999.
51. La frase aparece en la base del frontispicio del primer tratado de puentes: H. Gautier. *Traité des Ponts*. Paris : 1716.